第 41 卷　第 4 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 4
2023 年 12 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Dec., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.04.04

稳定物质转移通道形成的极小质量白矮星

刘广畅[1,2,3]，陈海亮[1,3]

(1. 中国科学院 云南天文台，昆明 650011； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 中国科学院 天体结构与演化实验室，昆明 650011)

摘要： 极小质量白矮星双星对于双星演化、公共包层、AM CVn 双星、星震学研究都十分重要。考虑到它们的周期比较短，它们还是重要的引力波源，然而它们的形成和演化仍然不清楚。通过利用最新的一种磁滞模型，建立了极小质量白矮星双星的形成和演化模型。研究给出它们形成的初始参数空间，并发现通过稳定物质转移形成的极小质量白矮星的质量范围为 $(0.11 \sim 0.21)\ M_{\odot}$。此外，研究发现部分极小质量白矮星双星能在宇宙年龄内演化成为 AM CVn 双星，这些极小质量白矮星的质量范围为 $0.14 \sim 0.16\ M_{\odot}$。研究还发现它们的引力波信号能被 LISA、天琴、太极探测器探测到。最后还讨论了不同的物质积累效率对于同一双星系统演化结果的影响，发现它除了明显影响主星最终质量外，对于伴星和双星演化过程并无太大影响。

关　键　词： 白矮星；密近双星；AM CVn 双星；引力波

中图分类号： P145.5　　　**文献标识码：** A

1　引　言

极小质量白矮星是一类质量小于 $0.3\ M_{\odot}$ 的 He 白矮星。目前发现的极小质量白矮星都处于双星之中，它的伴星主要包括 CO 白矮星、毫秒脉冲星和 A、F 型矮星[1–4]。极小质量白矮星对于双星演化、公共包层演化、星震学研究都十分重要[3, 5–10]。此外，由于这类双星的周期都比较短，它们能演化成为猎犬 AM 型星 (AM Canum Venaticorum, AM CVn) 和极端致密 X 射线双星，它们都是激光干涉仪空间天线 (Laser Interferometer Space Antenna, LISA)[11]、天琴[12]、太极[13]引力波探测器的重要搜寻对象。

关于极小质量白矮星双星的形成，主要有以下两种途径[8–10, 14, 15]。(1) 稳定物质转移途径：主星 (白矮星、中子星、主序星) +主序星 (伴星) 的双星系统，当伴星演化到主序末端、赫氏空隙或者红巨星底部的时候发生稳定物质转移，伴星抛掉富 H 包层之后，演化成为一

收稿日期： 2023-03-13；　**修回日期：** 2023-04-17

资助项目： 国家自然科学基金 (12073071)；云南省基础研究项目 (202001AT070058, 202101AW070003)

通讯作者： 刘广畅，liuguangchang@ynao.ac.cn

个 He 白矮星。(2) 公共包层演化途径：在上述的双星系统中，如果伴星发生动力学不稳定物质转移，双星会进入公共包层演化阶段。如果公共包层能被成功抛射掉，双星可以演化成为极小质量白矮星双星。

Sun 和 Arras[14] 研究了白矮星+极小质量白矮星双星的形成，发现极小质量白矮星 (质量小于 0.20 $M_{\odot}$) 的双星只能通过稳定物质转移通道形成，不能通过公共包层途径形成。Li 等人[9]比较全面地研究了白矮星+极小质量白矮星双星的形成。他们发现这类双星可以通过稳定物质转移和公共包层途径形成。前种途径形成的极小质量白矮星质量小于 0.22 $M_{\odot}$，而后种途径形成的极小质量白矮星质量大于 0.22 $M_{\odot}$。然而他们的模型并不能很好地解释一些周期短的极小质量白矮星双星。

Istrate 等人[15]研究了毫秒脉冲星+极小质量白矮星双星的形成。考虑到毫秒脉冲星形成时必须从伴星吸积物质，因而只能通过稳定物质转移通道形成。通过双星演化的计算，他们发现传统的双星模型很难形成这类双星系统，其参数诞生空间非常小；这个问题被称为“微调”问题。Chen 等人[10] 利用考虑磁场和星风效应的磁滞模型[16]，模拟了这类双星的形成和演化。他们发现利用这种新的磁滞，这类双星的诞生空间变大，从而为解决“微调”问题提供了一种途径；此外，他们的模型还解决了传统模型通过稳定物质转移很难产生极端致密 X 射线双星的问题[17, 18].

Tauris[19]发现极小质量白矮星双星可以继续演化形成 AM CVn 双星，并且它们的引力波信号，可以被 LISA 探测器探测到。Chen 等人[20] 研究了 CO 白矮星+He 白矮星双星的演化，给出了这类双星发生稳定物质转移的判据；并发现通过稳定物质转移形成的极小质量白矮星，大多能发生稳定物质转移形成 AM CVn 双星。

考虑到白矮星+极小质量白矮星双星和脉冲星+极小质量白矮星双星的相似性，以及毫秒脉冲星+极小质量白矮星双星的研究进展，我们希望利用 Van 等人[16]提出的磁滞模型，研究通过稳定物质转移通道形成的白矮星+极小质量白矮星双星以及它们后续的演化，进而研究它们的性质。

本文的结构如下：第 2 章主要介绍我们使用的程序以及采用的一些假设；第 3 章主要介绍双星数值模拟得到的结果；第 4 章主要讨论极小质量白矮星的后续演化，以及他们作为引力波源的性质；在第 5 章，我们给出文章的主要结论。

2 双星演化模型

我们使用 12115 版本的恒星天体物理实验模块 (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics, MESA)[21–25]中的双星模块来进行双星演化模拟。在我们的模拟中，将 CO 白矮星当作质点，不考虑其结构，其初始质量范围为 $(0.5 \sim 1.30)$ $M_{\odot}$；伴星是零龄主序星，初始质量范围为 $(1.0 \sim 1.50)$ $M_{\odot}$。初始的轨道周期范围为 $(1 \sim 300)$ d。伴星的初始金属丰度假设为太阳金属丰度，即 $Z = 0.02$ (H 丰度 $X = 0.70$，He 丰度 $Y = 0.28$)。此外，我们假设恒星的混合程参数 $\alpha = 2.0$。关于对流超射，对每个燃烧和非燃烧区的核心及壳层部分我

们采用指数形式的描述方法，并采用 f=0.01、f_0=0.005；对于氢核燃烧的上部采用阶段形式的描述方法，并采用 f=0.25、f_0=0.05。在我们的模拟中，假设伴星始终处于潮汐锁定的状态。我们采用 Reimers[26]的星风描述来计算恒星的星风物质损失率：

$$\dot{M}_{2,\mathrm{w}} = -4\times10^{-13}\eta\left(\frac{R_2}{R_\odot}\right)\left(\frac{L_2}{L_\odot}\right)\left(\frac{M_\odot}{M_2}\right) \quad , \tag{1}$$

其中，R_2、L_2、M_2 分别是伴星的半径、光度、质量，$R_\odot$、$L_\odot$、$M_\odot$ 分别是太阳的半径、光度、质量，角标 w 代表星风，在我们的计算中，对标量因子 $\eta=1$。$\dot{M}_{2,\mathrm{w}}$ 的单位为 $M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$。

关于双星演化过程中的角动量损失，我们主要考虑以下几种角动量损失机制。

(1) 在我们的计算中，采用 Van 等人[16]提出的磁滞模型，相比于 Rappaport 等人[27]的经典磁滞，该模型将恒星的对流、旋转、星风对系统角动量损失的影响考虑在内，具体的计算公式如下：

$$\frac{\mathrm{d}J_{\mathrm{mb}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}J_{\mathrm{mb(Sk)}}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\omega_2}{\omega_\odot}\right)^{\beta}\left(\frac{\tau_{\mathrm{conv}}}{\tau_{\odot,\mathrm{conv}}}\right)^{\xi}\left(\frac{\dot{M}_{2(\mathrm{w})}}{\dot{M}_{\odot(\mathrm{w})}}\right)^{\alpha} \quad , \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}J_{\mathrm{mb(Sk)}}}{\mathrm{d}t} = -3.8\times10^{-30}M_2R_\odot^4\left(\frac{R_2}{R_\odot}\right)^{\gamma_{\mathrm{mb}}}\omega_2^3 \quad , \tag{3}$$

其中，J 代表了系统的角动量，mb 代表磁滞，ω_2 是伴星的角速度，τ_{conv} 是伴星的对流时标，$\dot{M}_{2(\mathrm{w})}$ 是伴星的星风物质损失率。对于太阳，$\omega_\odot=3.0\times10^6\ \mathrm{s}^{-1}$、$\tau_{\odot,\mathrm{conv}}=2.8\times10^6$ s、$\dot{M}_{\odot(\mathrm{w})}=2.54\times10^{-14}\ M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$。Van 等人[16]发现，采用 $\beta=0$、$\xi=2$、$\alpha=1$、$\gamma_{\mathrm{mb}}=4$ 能更好地解释 X 射线双星的一些观测性质。因而，在我们的模拟中，也采用这些取值。此外，我们假设伴星演化成完全对流星时或者伴星初始质量大于等于 1.5 $M_\odot$ 时，磁滞停止工作。

(2) 引力波引起的角动量损失采用 Landau 和 Lifshitz[28]的计算公式：

$$\dot{J}_{\mathrm{GW}} = -\frac{32}{5}\frac{G^{\frac{7}{2}}}{c^5}\frac{M_{\mathrm{CO}}^2M_2^2(M_{\mathrm{CO}}+M_2)^{\frac{1}{2}}}{a^{\frac{7}{2}}} \quad , \tag{4}$$

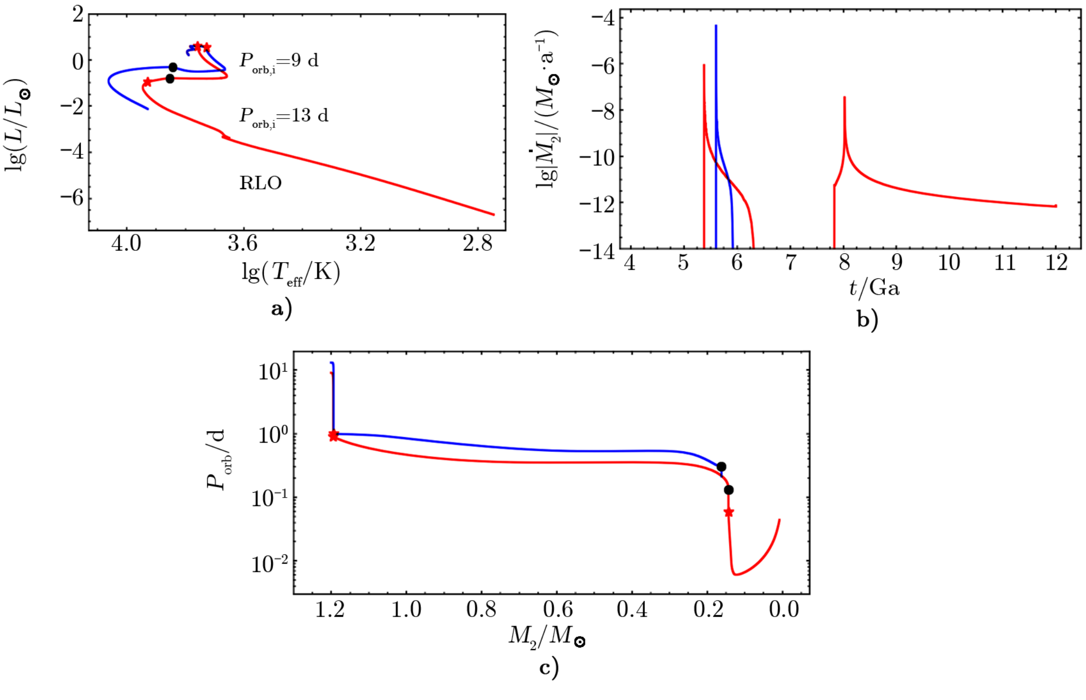
其中，G 是引力常数，c 是光速，M_{CO} 是 CO 白矮星的质量，a 是双星的间距。

(3) 本工作中，我们采用 Ritter[29]的公式计算物质转移速率，采用“各向同性再发”星风模型[30]。在这个模型中，我们假设只有很少比例的物质会被白矮星吸积，其余的物质都以星风的形式离开系统，并带走白矮星的比角动量。从以前关于吸积白矮星演化模拟的结果[31]，我们知道，白矮星吸积的物质只能在很小的吸积率范围内稳定燃烧，并且如果吸积率低于它的稳定燃烧速率下限，白矮星的燃烧是不稳定的，会以新星的方式损失掉物质。此外，如果吸积率特别低，由于吸积物质与白矮星之间的混合，白矮星甚至会损失自身的质量[32]。因而，在我们的计算中，假设只有 10% 的物质会被白矮星积累。此外，我们假设物质转移过程受爱丁顿吸积率的限制。

3 研究结果

3.1 双星演化的例子

在图 1 中，我们展示了两个双星演化的例子。在这两个例子中，双星系统的主序星质量都是 1.2 $M_\odot$，白矮星质量都为 0.9 $M_\odot$，初始周期分别是 9 d 和 13 d。对比发现，周期较短的双星发生物质转移较早。当伴星将氢壳层都损失掉之后，双星的第一次物质转移结束，此时伴星的质量分别为 0.142 $M_\odot$ 和 0.161 $M_\odot$，周期为 0.132 d 和 0.303 d。随后，在引力波的作用下，双星的间距继续缩小。对于初始周期较短的双星，在宇宙年龄内会发生第二次物质转移，双星演化成 AM CVn 双星；而对于初始周期较长的双星，在第一次物质转移结束时，双星的间距较大，该双星不能在宇宙年龄内发生第二次物质转移，最后演化成一个分离的双白矮星系统。对于初始周期较短的双星，在第二次物质转移阶段，周期先变短后变长。这主要是因为：在这个阶段双星间距的演化主要由引力波辐射和物质转移过程主导，物质从小质量伴星向大质量主星转移会使双星的间距变大。在第二阶段物质转移的初期，引力波辐射占主导，因此双星的间距变小。当伴星表面的 H 被剥离完之后，随着物质转移主导双星间距的演化，双星的间距逐渐变大。

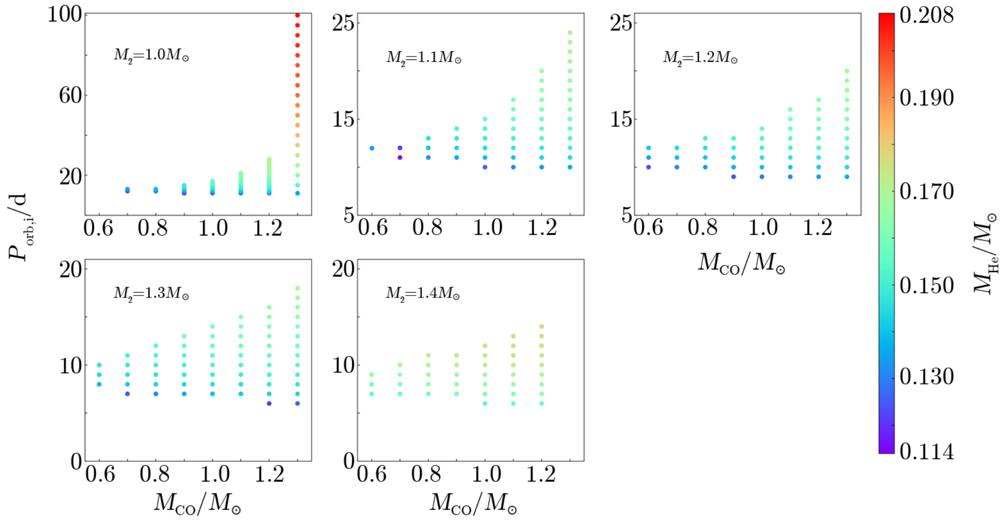


注：在两个例子中，白矮星和伴星的初始质量分别为 0.90 $M_\odot$ 和 1.20 $M_\odot$，初始双星周期为 9 d (红色的实线) 和 13 d (蓝色的实线)。a) 伴星在赫罗图上的演化轨迹；b) 双星物质转移速率随时间的演化；c) 双星周期随伴星质量的演化。图中红星表示双星物质转移的开始，黑点代表双星物质转移的结束。

图 1 双星演化的两个例子

3.2　能形成极小质量白矮星双星的参数空间

在图 2 中，我们展示了能产生极小质量白矮星双星的初始参数空间。从图中我们可以看出，对于伴星初始质量小于 1.0 $M_\odot$ 或者大于 1.40 $M_\odot$ 的双星，不能产生极小质量白矮星。这主要是因为对于伴星质量小的双星，在宇宙年龄内，伴星仍处于主序阶段；而对于伴星初始质量较大的双星，由于此时磁滞已经不起作用，双星很难演化成极小质量白矮星双星；Li 等人[9] 假设磁滞对于伴星质量大于或等于 1.50 $M_\odot$ 的双星也起作用，因而在他们的结果中，这类双星也能演化产生极小质量白矮星双星。在每一幅子图中，如果双星初始的周期太短，伴星在主序阶段早期发生物质转移，由于伴星内部没有 He 核，因此不能演化成为白矮星。如果双星的初始周期太长，伴星发生物质转移的时候处于红巨星阶段，则不能发生稳定的物质转移。此外，从图中还可以看出，形成的极小质量白矮星的质量范围为 $(0.11 \sim 0.21)\ M_\odot$。这与 Li 等人[9]的结论一致，他们发现质量小于 0.22 $M_\odot$ 的极小质量白矮星主要通过稳定物质转移。

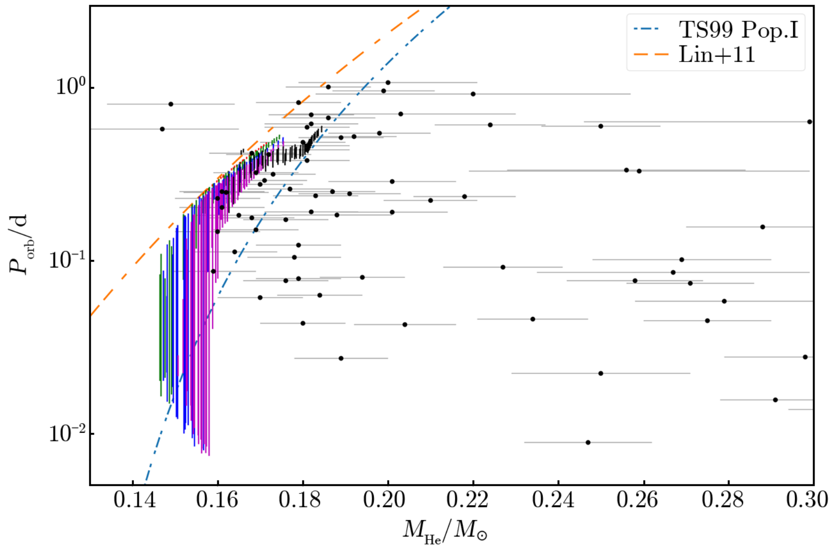


注：不同的子图对应不同的初始伴星质量，点的颜色表示极小质量白矮星的质量。

图 2　能形成极小质量白矮星双星的参数空间

3.3　He 白矮星质量–双星轨道周期关系

图 3 展示了，我们得到的分离的极小质量白矮星双星的 He 白矮星质量-双星轨道周期的关系。其中最长的周期对应于 He 白矮星开始冷却的时间，之后双星的周期会在引力波的作用下变短。最短的周期对应于第二次物质转移开始的时候或者演化时间到达宇宙年龄的时刻 (如果没有第二次物质转移)。从图中可以看出，我们得到的质量-周期关系与 Lin 等人[35] 提出的质量-周期关系更接近。我们的结果能解释一些极小质量白矮星双星。这些结果与 Li 等人[9]的结果一致。按照 Li 等人[9]的结果，其他的双星来自公共包层途径或者低金属丰度的双星演化的可能性更大。



注：带误差棒的点是来自 Brown 等人[33]的 62 个干净样本和 Brown 等人[34]新增的 17 个样本。实线表示我们得到的分离的极小质量白矮星双星的数据。其中最长的周期对应白矮星开始冷却的时候，最短的周期对应的是第二次物质转移开始的时候或者是演化时间到达宇宙年龄的时候 (如果没有第二次物质转移)。黄色虚线和蓝色的点虚线分别对应 Lin 等人[35]与 Tauris 和 Savonije[36]提出的质量-周期关系。

图 3　极小质量白矮星双星的 He 白矮星质量-双星轨道周期关系

4　讨论

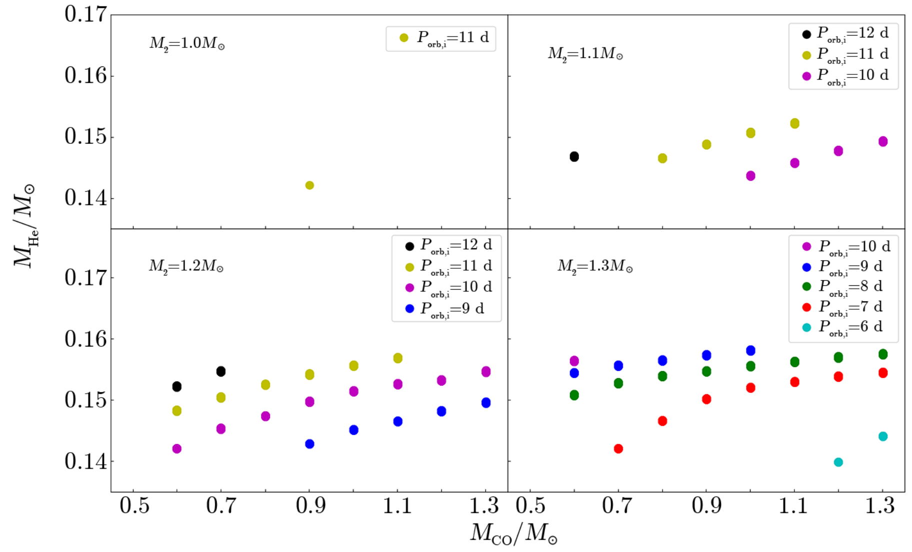
4.1　AM CVn 系统的形成

在图 1 中，我们可以发现有些双星可以先演化成极小质量白矮星双星，然后演化成 AM CVn 双星。在图 4 中，我们展示了能演化成 AM CVn 双星的 He 白矮星质量对初始CO 白矮星质量的依赖关系。从这幅图我们可以看出，这类极小质量白矮星双星的 He 白矮星中的质量范围为 (0.14 ~ 0.16) $M_\odot$，这与 Tauris[19]得出的结论一致。对于相同的初始 CO 白矮星质量、伴星质量，周期越长，得到的 He 白矮星质量越大；这主要是因为初始周期越长，对应的伴星洛希瓣也越大。伴星发生物质转移时，中心 He 核的质量也越大。对于相同的初始伴星质量和周期，CO 白矮星初始质量越大，得到的 He 白矮星质量越大；这主要是因为 CO 白矮星初始质量越大，双星演化过程中，双星越早发生质量比反转，使得双星的物质转移时间变长，He 核增加得越大，从而得到越大的 He 白矮星质量。

此外，我们发现，对于伴星初始质量为 1.40 $M_\odot$ 的双星系统，并不能通过这种途径产生 AM CVn 双星。这是因为第一次物质转移结束后，轨道周期较长，在宇宙年龄内，引力波辐射不足以使双星间距变得足够小，从而发生第二次物质转移。

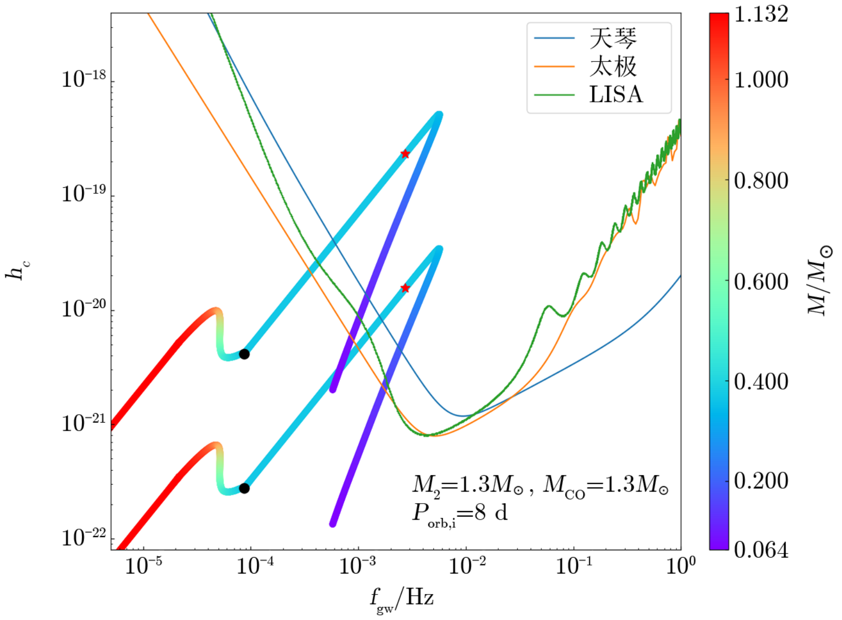
4.2　作为引力波源的性质

图 5 展示了一个极小质量白矮星双星的形成和演化过程中产生的特征应变随引力波频



注：图中 4 图分别对应不同的初始伴星质量。每幅子图中不同颜色对应不同的初始双星周期。

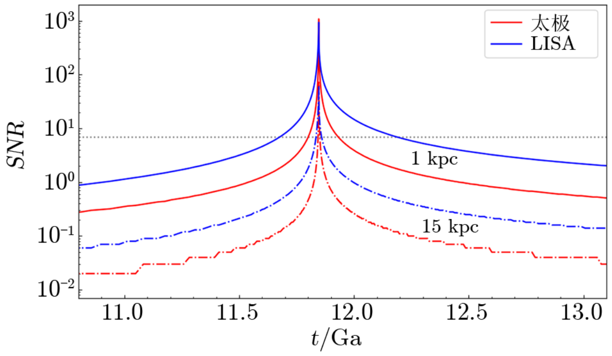
图 4　能演化成为 AM CVn 双星的极小质量白矮星双星中的 He 白矮星质量对初始 CO 白矮星质量的依赖关系



注：双星的初始参数为 $M_{CO} = 1.30\ M_\odot$、$M_2 = 1.30\ M_\odot$、$P_{orb} = 8.0$ d。图中的两条演化曲线对应假设该双星位于 1 kpc 和 15 kpc 的位置。颜色棒表示双星的啁啾质量。蓝色、红色、绿色的曲线分别代表的是天琴探测器 (运行时间 5 a)、太极探测器 (运行时间 5 a) 和 LISA 探测器 (运行时间 4 a) 的灵敏度曲线。黑色的点和红星分别代表第一次物质转移结束和第二次物质转移开始的时刻。

图 5　极小质量白矮星双星的形成和演化过程中产生的特征应变随引力波频率的演化

率的演化。对于给定距离的双星和指定的引力波探测器，我们可以利用 LEGWORK[37] 软件包计算相对应的信噪比。图 6 展示了这个双星的信噪比随时间的演化。从图中可以看出，在 1 kpc 和 15 kpc 的位置，信噪比分别可以达到约 1 000 和 80。这意味着这个双星可以被 LISA、天琴和太极探测器探测到。当这个源在 1 kpc (15 kpc) 的位置，能被 LISA 探测到的范围内，它的 He 白矮星质量范围为 $0.014M_\odot \sim 0.157M_\odot$ ($0.039M_\odot \sim 0.157M_\odot$)，啁啾质量范围为 $0.089M_\odot \sim 0.371M_\odot$ ($0.165M_\odot \sim 0.371M_\odot$)。对于能演化成为 AM CVn 双星的极小质量白矮星双星，如果它的 $\dot{f}_{\rm GW}$ 较高，我们有希望测出双星的啁啾质量，考虑到这类白矮星中的 He 白矮星质量为 $(0.14 \sim 0.16)\ M_\odot$，我们进而可以推测出 CO 白矮星的质量。



注：初始双星参数与图 5 一致。实线和虚线分别对应双星位于 1 kpc 和 15 kpc 的位置，红色和蓝色的线分别对应于天琴和 LISA 探测器，点线对应于临界信噪比 $SNR = 7$。

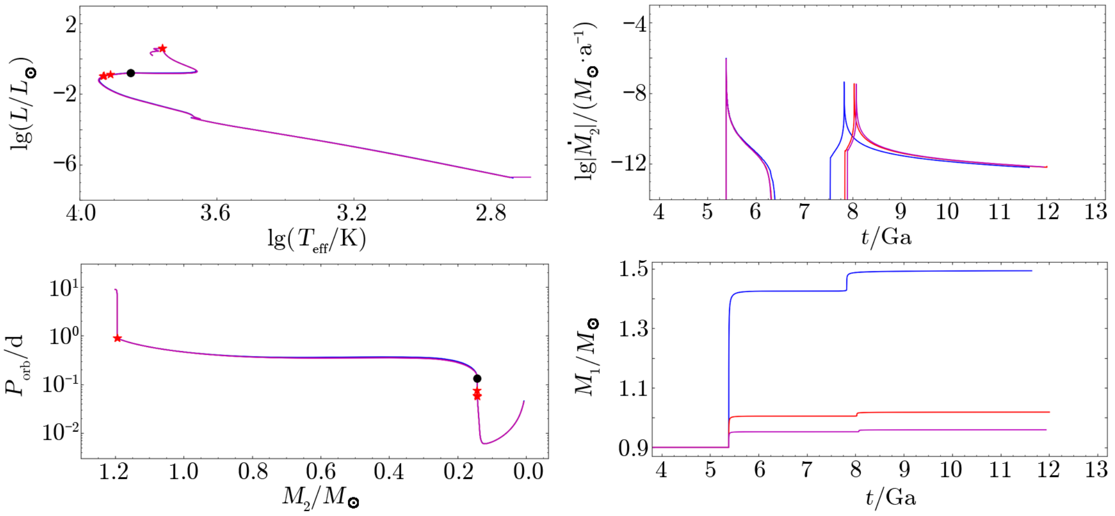
图 6　双星的信噪比随时间的演化

4.3　物质积累效率的影响

我们在计算中，假设吸积白矮星的质量积累效率为常数 0.10。考虑到这个积累效率的不确定性，我们研究了质量效率对结果的影响。在图 7 中，我们对比了质量积累效率为 0.50、0.10、0.05 下的双星演化结果。在这幅图中，双星的初始参数是：主星的质量为 0.90 $M_\odot$，伴星的质量为 1.20 $M_\odot$，周期为 9.0　d。从这幅图可以看出，质量积累效率对伴星的演化、物质转移速率的演化以及双星周期演化的影响相对较小，但对吸积白矮星的质量影响较大。质量积累效率越大，白矮星积累的质量越大。伴星在第一次物质转移结束后质量分别为 0.142 8 $M_\odot$、0.142 9 $M_\odot$、0.143 5 $M_\odot$。可见，质量积累效率对于形成的极小质量白矮星的质量影响也很小。

5　总 结

利用 Van 等人[16]提出的磁滞模型，我们建立白矮星+主序星双星的演化模型，计算了一个双星演化网格，白矮星的质量范围为 (0.50 ～ 1.30) $M_\odot$，主序星的质量范围为 $(1.0 \sim 1.50)\ M_\odot$, 初始周期范围为 $(1.0 \sim 300.0)$ d。进而，我们研究了通过稳定物质转移通



注：从上至下四幅图分别展示了伴星在赫罗图上的演化、物质转移速率的演化、双星周期随伴星质量的演化以及吸积白矮星质量随时间的演化。双星中的主星初始质量为 $0.9M_\odot$，伴星初始质量为 $1.2M_\odot$，初始双星轨道周期为 9 d。图中蓝色、红色和紫色分别对应质量积累效率为 0.5、0.1、0.05。图中红星依然表示的是双星物质转移的开始时刻，黑点代表的是双星物质转移的结束时刻。

图 7　吸积白矮星的质量积累效率对双星演化的影响

道形成的极小质量白矮星双星，得到的主要结果如下：

(1) 我们给出了能产生极小质量白矮星双星的初始参数空间 (如图 2 所示)，且发现通过稳定物质转移通道形成的极小质量白矮星的质量范围为 $(0.11 \sim 0.21)\ M_\odot$。

(2) 我们发现，通过稳定物质转移通道产生的极小质量白矮星双星符合白矮星质量-轨道周期关系，且我们的结果能很好地解释质量相对较小的极小质量白矮星的形成问题 (见图 3)。

(3) 我们发现部分极小质量白矮星双星能演化成为 AM CVn 双星，这类极小质量白矮星双星中的 He 白矮星质量范围为 $(0.14 \sim 0.16)\ M_\odot$。

(4) 我们发现极小质量白矮星双星和 AM CVn 双星的引力波信号能被 LISA、天琴、太极探测器探测到。

(5) 我们最后还讨论了不同的物质积累效率对于双星演化过程的影响，发现它除了会明显影响主星在物质转移结束后的质量外，对于双星的物质转移过程、伴星的质量，双星的轨道周期并无太大影响。

参考文献：

[1] Maxted P F L, Anderson D R, Burleigh M R, et al. MNRAS, 2011, 418(2): 1156

[2] Maxted P F L, Bloemen S, Heber U, et al. MNRAS, 2014, 437(2): 1681

[3] Istrate A G, Tauris T M, Langer N. A&A, 2014, 571: A45
[4] Brown W R, Kilic M, Kosakowski A, et al. ApJ, 2017, 847(1): 10
[5] Jeffery C S, Saio H. MNRAS, 2013, 435(1): 885
[6] Córsico A H, Althaus L G, Serenelli A M, et al. A&A, 2016, 588: A74
[7] Istrate A G, Fontaine G, Gianninas A, et al. A&A, 2016, 595: L12
[8] Chen X, Maxted P F L, Li J, et al. MNRAS, 2017, 467(2): 1874
[9] Li Z, Chen X, Chen H L, et al. ApJ, 2019, 871(2): 148
[10] Chen H L, Tauris T M, Han Z, et al. MNRAS, 2021, 503: 3540
[11] Amaro-Seoane P, Andrews J, Arca Sedda M, et al. arXiv:2203.06016, 2022
[12] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 5010
[13] Ruan W H, Guo Z K, Cai R G, et al. International Journal of Modern Physics A, 2020, 35(17): 50075
[14] Sun M, Arras P. ApJ, 2018, 858(1): 14
[15] Istrate A G, Tauris T M, Langer N, et al. A&A, 2014, 571: L3
[16] Van K X, Ivanova N, Heinke C O. MNRAS, 2019, 483(4): 5595
[17] van der Sluys M V, Verbunt F, Pols O R. A&A, 2005, 431: 647
[18] van der Sluys M V, Verbunt F, Pols O R. A&A, 2005, 440(3): 973
[19] Tauris T M. Phys Rev Lett, 2018, 121(13): 1105
[20] Chen H L, Chen X, Han Z. ApJ, 2022, 935(1): 9
[21] Paxton B, Bildsten L, Dotter A, et al. ApJS, 2011, 192: 3
[22] Paxton B, Cantiello M, Arras P, et al. ApJS, 2013, 208: 4
[23] Paxton B, Marchant P, Schwab J, et al. ApJS, 2015, 220: 15
[24] Paxton B, Schwab J, Bauer E B, et al. ApJS, 2018, 234(2): 34
[25] Paxton B, Smolec R, Schwab J, et al. ApJS, 2019, 243(1): 10
[26] Reimers D. Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege, 1975, 8: 369
[27] Rappaport S, Verbunt F, Joss P C. ApJ, 1983, 275: 713
[28] Landau L D, Lifshitz E M. The classical theory of fields. Oxford: Pergamon Press, 1971: 1
[29] Ritter H. A&A, 1988, 202: 93
[30] Tauris T M, van den Heuvel E P J. Compact stellar X-ray sources. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 623
[31] Chen H L, Woods T E, Yungelson L R, et al. MNRAS, 2019, 490(2): 1678
[32] Yaron O, Prialnik D, Shara M M, et al. ApJ, 2005, 623: 398
[33] Brown W R, Gianninas A, Kilic M, et al. ApJ, 2016, 818(2): 155
[34] Brown W R, Kilic M, Kosakowski A, et al. ApJ, 2022, 933(1): 94
[35] Lin J, Rappaport S, Podsiadlowski P, et al. ApJ, 2011, 732(2): 70
[36] Tauris T M, Savonije G J. A&A, 1999, 350: 928
[37] Wagg T, Breivik K, de Mink S. The Journal of Open Source Software, 2022, 7(70): 3998

Formation of Extremely Low Mass White Dwarf Binaries via a Stable Mass Transfer Channel

LIU Guang-chang[1,2,3], CHEN Hai-liang[1,3]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Science, Kunming 650011, China)

Abstract: Extremely low mass white dwarf (ELM WD) binaries are important for studies of binary evolution, common envelope, AM CVn binaries and asteroseismology . Due to their short orbital periods, they are also important gravitational wave sources. However, their formation and evolution is not well understood. By using a newly suggested magnetic braking prescription，modeling the formation and evolution of ELM WD binaries via a stable mass transfer channel. Research presents the initial binary parameter space for the formation of ELM WD binaries and find the He WD masses in these binaries are (0.11 $\sim$ 0.21) $M_{\odot}$. In addition, research finds that some extremely low mass white dwarf binaries can evolve into AM CVn binaries within the Universe age and these binaries have He WD masses of (0.14 $\sim$ 0.16) $M_{\odot}$. Research also finds that the gravitational wave signal from these binaries can be detected by the space-borne gravitational wave observatories, such as LISA, TianQin, TaiJi. Finally research also discusses the impact of different material accumulation efficiencies on the evolution results of the same binary system, and it finds that it not only significantly affects the final mass of the main star, but also has little impact on the donor star and the evolution process of binary system.

Key words: white dwarf; close binary; AM CVn binary; gravitational wave